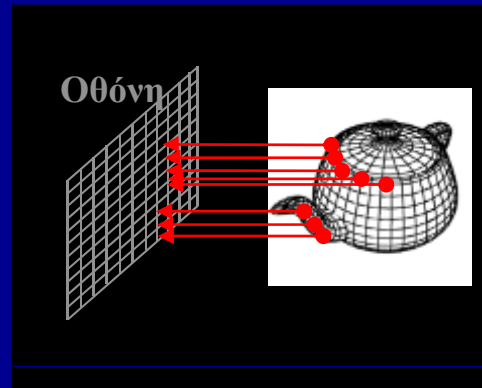


Υλικά, φωτισμός και χρωματισμός

# Ζωγραφίζουμε, που;

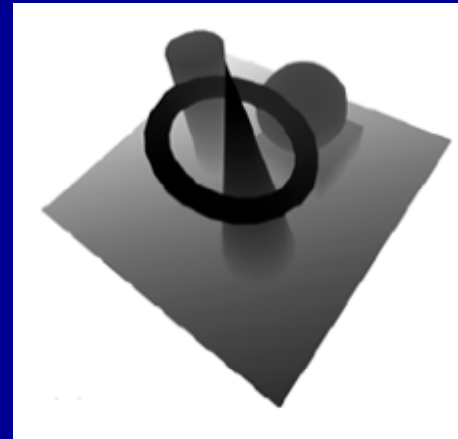
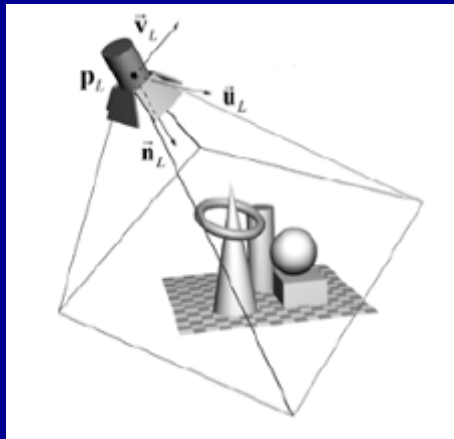
Είπαμε ότι ζωγραφίζουμε την σκηνή παίρνοντας κάθε σημείο και προβάλλοντας το στην οθόνη. Στην πραγματικότητα το αποθηκεύουμε σε μια περιοχή της μνήμης που λέγεται colour buffer (ή frame buffer).



- Η ενδιάμεση αυτή μνήμη έχει την μορφή διδιάστατου πίνακα  $M \times N$  (η ανάλυση της τελικής εικόνας).
- Κάθε στοιχείο του πίνακα αποθηκεύει το χρώμα κάθε σημείου της σκηνής συνήθως σε μορφή RGBA (Red, Green, Blue και Alpha )
- Μόλις τελειώσουμε να ζωγραφίζουμε την σκηνή, η κάρτα γραφικών παίρνει αυτήν την ενδιάμεση μνήμη και δείχνει την εικόνα στην οθόνη.
- Μπορούμε να έχουμε πάνω από μια τέτοιες ενδιάμεσες μνήμες (double buffering)

# Ζωγραφίζουμε, που;

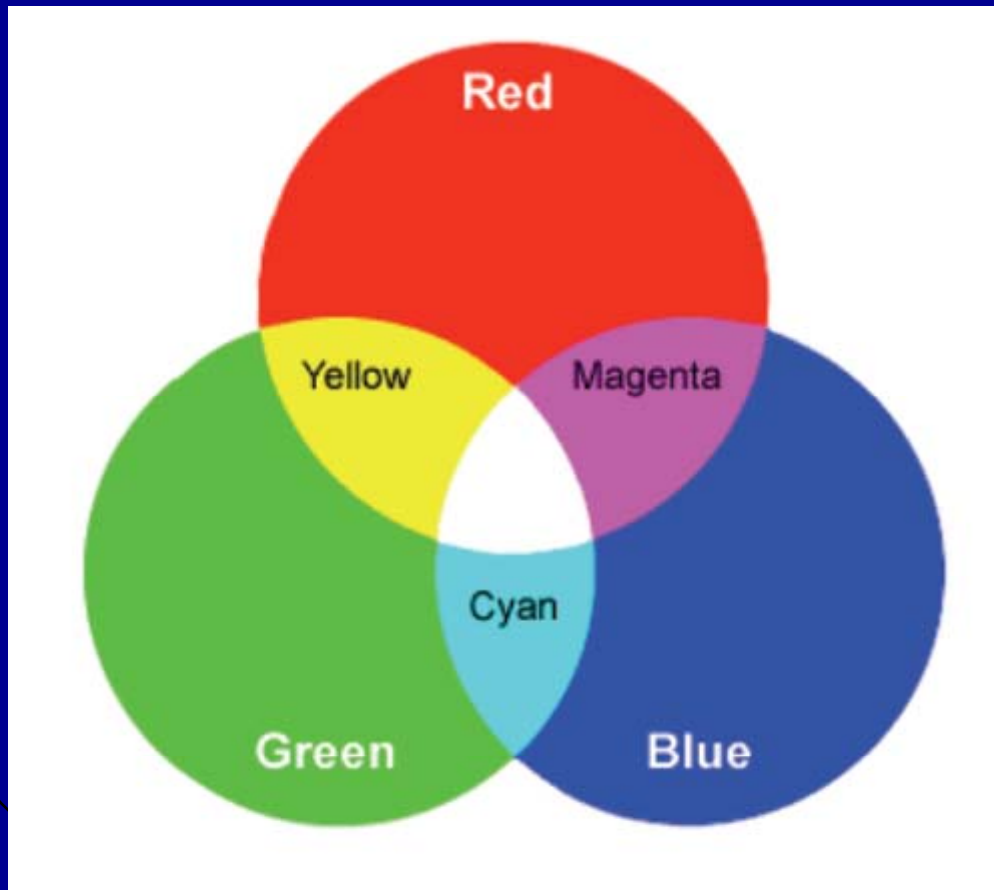
Μια άλλη ενδιαμέση μνήμη που λειτουργεί συμπληρωματικά του colour buffer είναι ο z-buffer. Όπως ο colour buffer αποθηκεύει το χρώμα κάθε σημείου, ο z-buffer (που έχει τον ίδιο αριθμό pixel με αυτόν) αποθηκεύει το βάθος σκηνής του σημείου.



- Κάθε στοιχείο του z-buffer αποθηκεύει ένα μόνο αριθμό (το βάθος του σημείου)
- Μικρές τιμές στον z-buffer (σκούρες περιοχές) υποδηλώνουν μικρό βάθος
- Μεγάλες τιμές στον z-buffer (φωτεινές περιοχές) υποδηλώνουν μεγάλο βάθος

# Γιατί RGB;

Τα RGB (κόκκινο-πράσινο-μπλε) είναι συμπληρωματικά χρώματα. Με την σύνθεση τους μπορούμε να παράγουμε τα άλλα χρώματα που βλέπουμε στην οθόνη του υπολογιστή



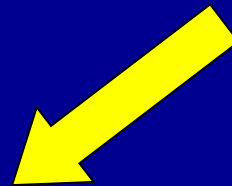
Στον υπολογιστή ένα RGB χρώμα αναπαρίσταται με μια τριάδα (r,g,b). Κάθε ένας από τους r,g,b αριθμούς υποδηλώνει το ποσοστό κάθε συστατικού χρώματος στο τελικό χρώμα. Συνήθως παίρνουν τιμές από 0.0 μέχρι 1.0 (floating point) ή 0 ως 255

Όταν λέμε ότι μια κάρτα γραφικών είναι 24-bit εννοούμε ότι χρησιμοποιεί 8 bit για την αναπαράσταση κάθε συστατικού (r,g,b) ενός χρώματος

# Τι μας κάνει να βλέπουμε το κόσμο;

Η απάντηση είναι το Φως!

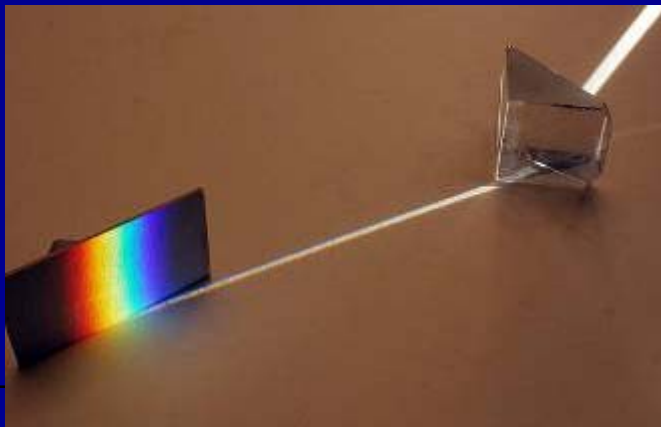
- Το φως που προέρχεται από τον Ήλιο ή από άλλες πηγές (πχ λάμπα δωματίου) ανακλάται πάνω στις επιφάνειες των αντικειμένων (ή περνά και από μέσα) και φτάνει στο μάτι μας.



# Υλικά και φως

Και γιατί κάθε αντικείμενο φαίνεται να έχει διαφορετικό χρώμα;

- Το φως που μας φαίνεται άσπρο στην πραγματικότητα είναι ένα συνδυασμός από πολλά χρώματα.
- Όλα τα αντικείμενα (υλικά) του κόσμου μας έχουν την ιδιότητα να απορροφούν τα περισσότερα χρώματα του φωτός και να ανακλούν μόνο ένα μικρό μέρος.
  - Παράδειγμα ένα φύλλο ενός δέντρου απορροφά όλα τα χρώματα του φωτός εκτός από τις αποχρώσεις πράσινου. Έτσι το φως που φτάνει σε μας είναι πράσινο και το φύλλο μας φαίνεται πράσινο.
  - Κάτι βαμμένο άσπρο ανακλά όλα τα χρώματα του φωτός και κάτι μαύρο τα απορροφά όλα (γι αυτό λένε να φοράμε ανοιχτόχρωμα ρούχα το καλοκαίρι!)



# Υλικά και φως

Τα αντικείμενα (υλικά) έχουν και άλλες ιδιότητες

- Αντικείμενα φτιαγμένα από μέταλλο ή γυαλί φαίνονται γυαλιστερά
- Αντικείμενα από χαρτί, ξύλο φαίνονται ματ
- Αντικείμενα από γυαλί ή ημιδιάφανο πλαστικό αφήνουν το φως να περάσει από μέσα τους, προκαλώντας ή όχι διάθλαση

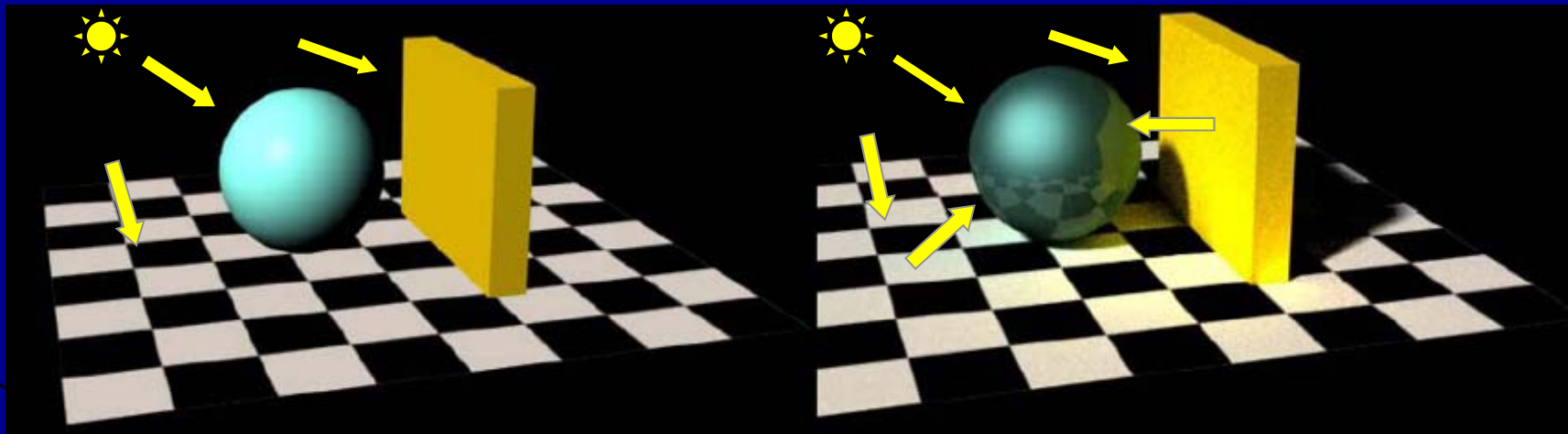


Το υλικό κάθε αντικειμένου καθορίζει πως αυτό θα αλληλεπιδράσει με το φως και πως θα φανεί τελικά το αντικείμενο στον παρατηρητή

# Μοντέλα φωτισμού

Συγκεκριμένη και απλοποιημένη παράσταση φυσικών νόμων που διέπουν τον φωτισμό

- Τοπικό μοντέλο : Απευθείας φωτισμός (direct lighting)
  - Λαμβάνει υπόψη μόνο άμεση πρόσπτωση φωτός σε μια επιφάνεια
  - το φως ξεκινά από την πηγή, ανακλάται στην επιφάνεια και φτάνει στον παρατηρητή
- Γενικό μοντέλο : Έμμεσος φωτισμός (global illumination)
  - λαμβάνει υπ' όψη και την έμμεση πρόσπτωση φωτός, δηλαδή την αλληλεπίδραση φωτός-επιφανειών
  - το φως κατά την πορεία του προς την επιφάνεια και το παρατηρητή ανακλάται και σε άλλες επιφάνειες.



# Μοντέλα φωτισμού

- Τοπικό μοντέλο : Απευθείας φωτισμός (direct lighting)
  - Υλοποιείται εύκολα
  - Φτηνό σε υπολογισμούς
  - Υποστήριξη από επεξεργαστές γραφικών (GPU)
  - Χρησιμοποιείται κατά κόρον σε παιχνίδια και αλληλεπιδραστικές εφαρμογές
  - Στα παιχνίδια ο έμμεσος φωτισμός εξομοιώνεται με πολλά τρικ
- Γενικό μοντέλο : Έμμεσος φωτισμός (global illumination)
  - Δύσκολη υλοποίηση (πολλά μαθηματικά)
  - Ακριβό στους υπολογισμούς
  - Όχι μεγάλη υποστήριξη από GPUs
  - Χρησιμοποιείται περισσότερο σε ταινίες και όπου χρειάζεται μεγάλος ρεαλισμός

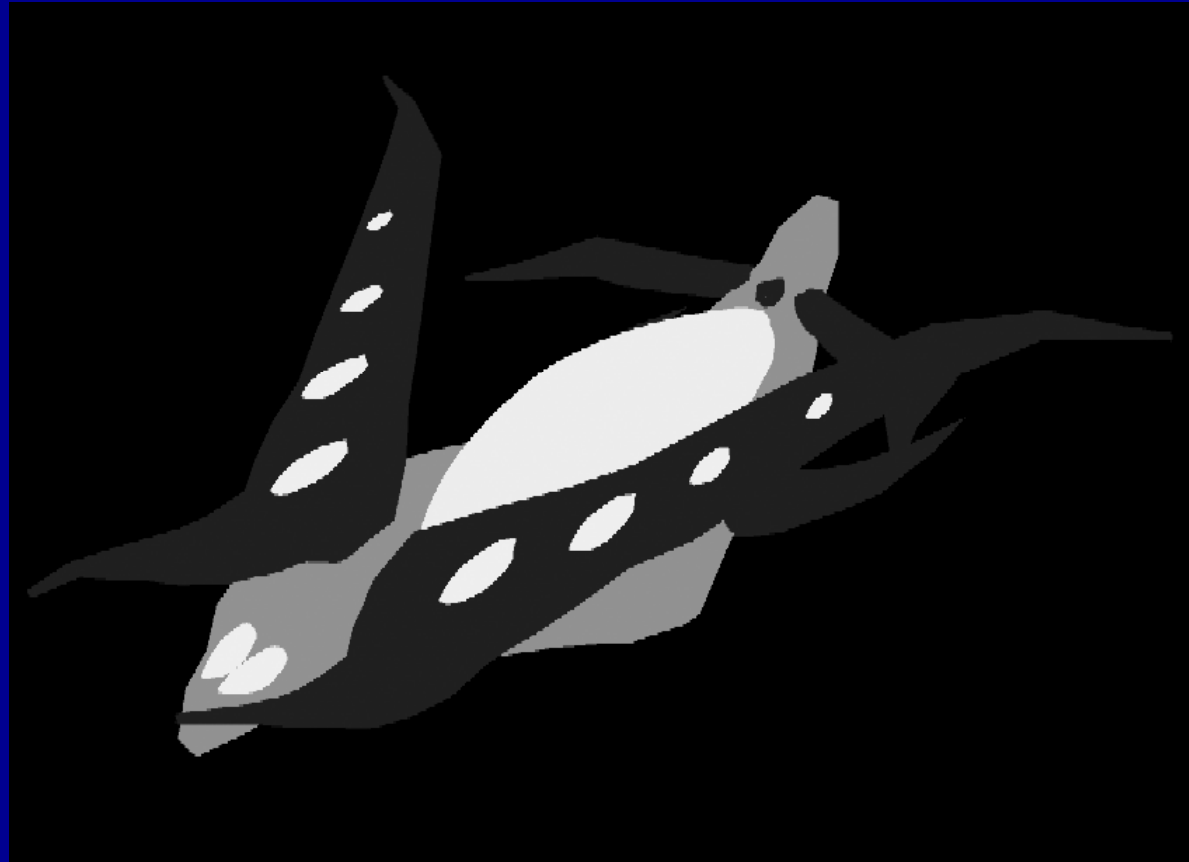
# Μοντέλα φωτισμού



# Μοντέλα φωτισμού : παραδείγματα



# Γιατί φωτισμός;



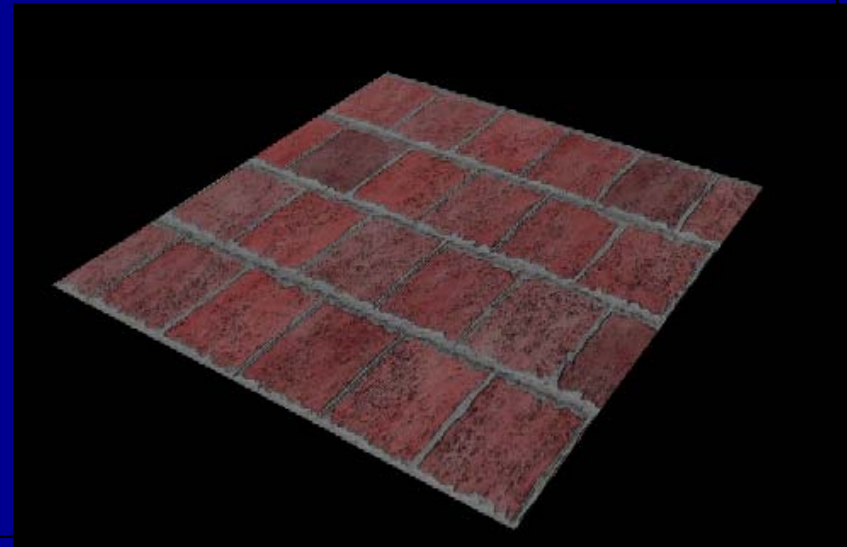
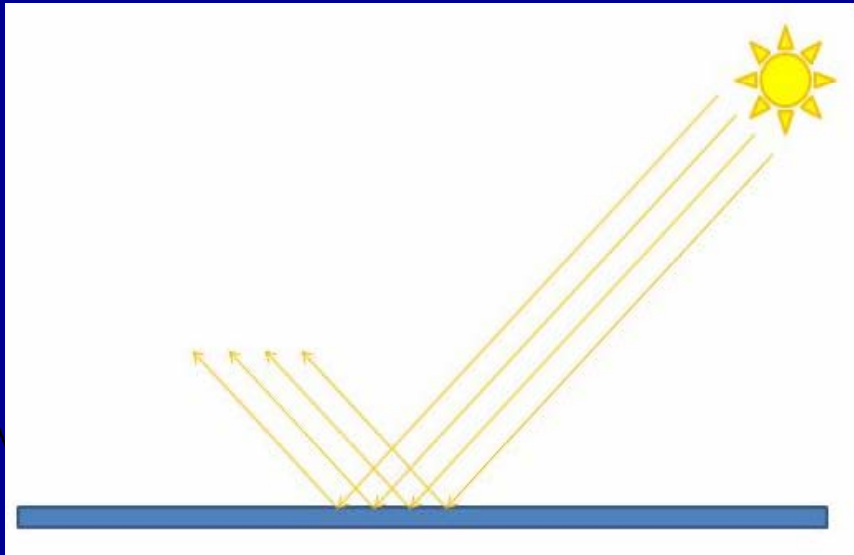
# Γιατί φωτισμός;



# Είδη φώτων

Στο τοπικό μοντέλο φωτισμού χρησιμοποιούμε 3 ειδών φώτα

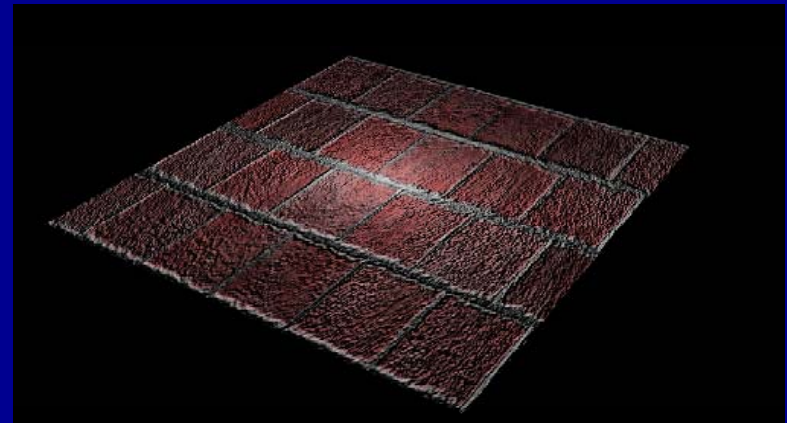
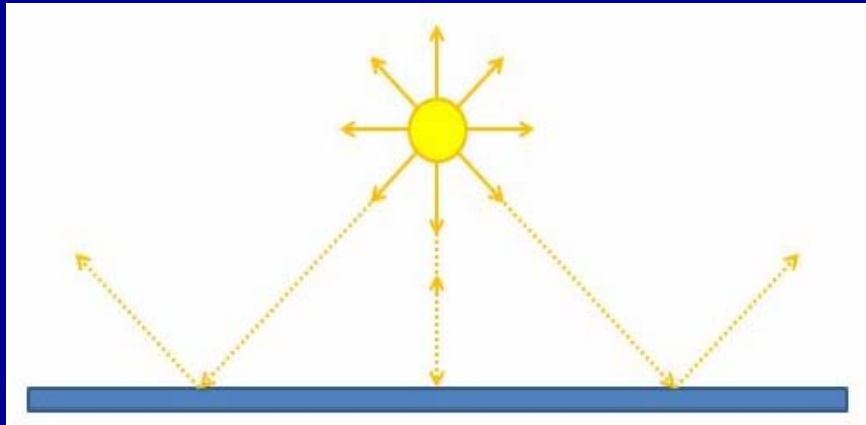
- Κατευθυνόμενο φως (directional light)
  - Το φως έχει χρώμα, συγκεκριμένη κατεύθυνση και παράλληλες ακτίνες, αλλά όχι θέση (ήλιος ή άλλη πολύ μακρινή πηγή φωτός)
  - Φωτίζει όλα τα αντικείμενα εξίσου
  - Προσφέρεται για γρήγορους υπολογισμούς



# Είδη φώτων

Στο τοπικό μοντέλο φωτισμού χρησιμοποιούμε 3 ειδών φώτα

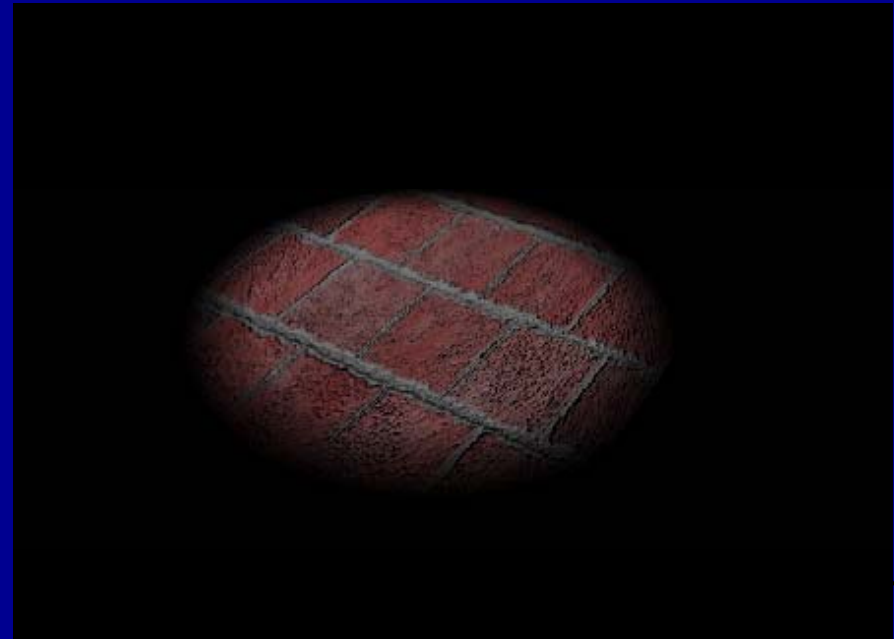
- Σημειακό φως (point light) : Το φως έχει χρώμα και θέση αλλά όχι κατεύθυνση (λάμπα δωματίου)



# Είδη φώτων

Στο τοπικό μοντέλο φωτισμού χρησιμοποιούμε 3 ειδών φώτα

- Προβολέας (spot light)
  - Το φως έχει χρώμα, θέση και κατευθύνεται σε ένα συγκεκριμένο κώνο (φακός)
  - Πιο πολύπλοκο σχεδιασμό, ακριβό στους υπολογισμούς.



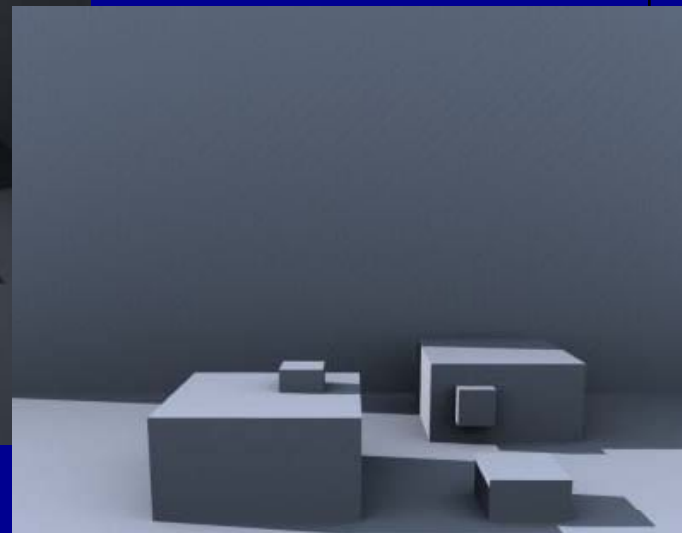
# Είδη φώτων



spot



σημειακό

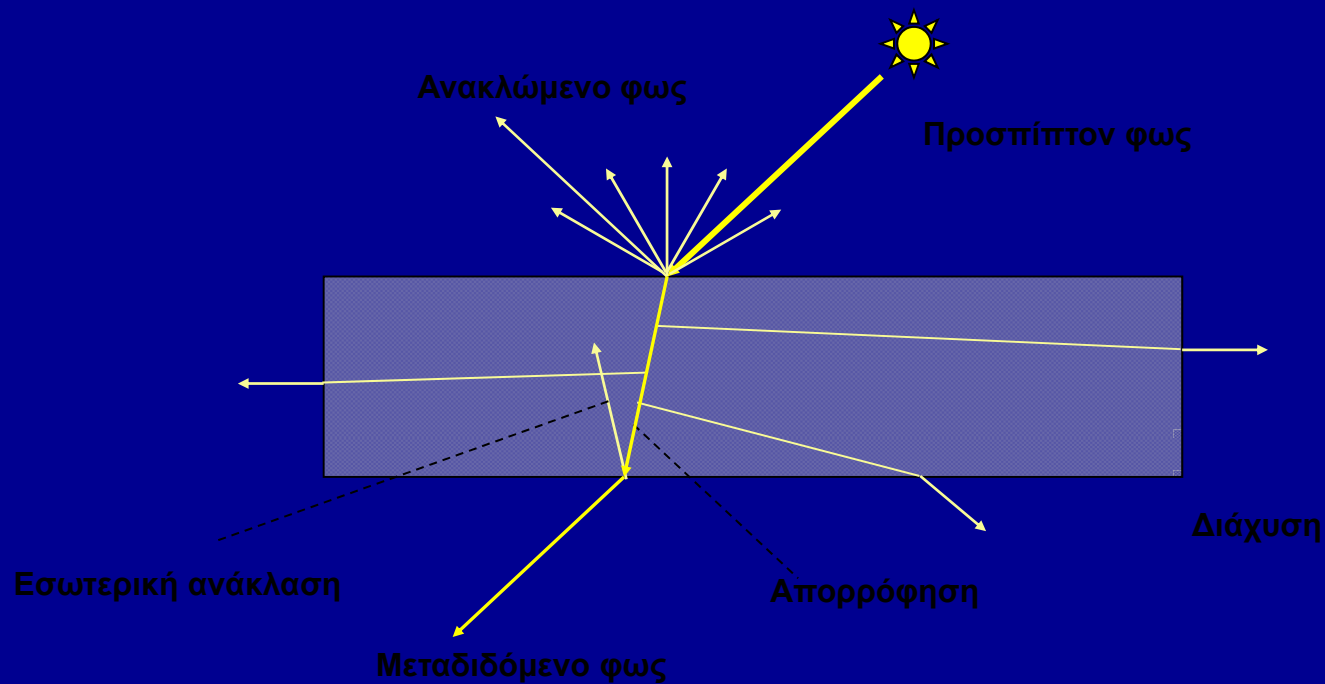


κατευθυνόμενο

# Φυσική του φωτός

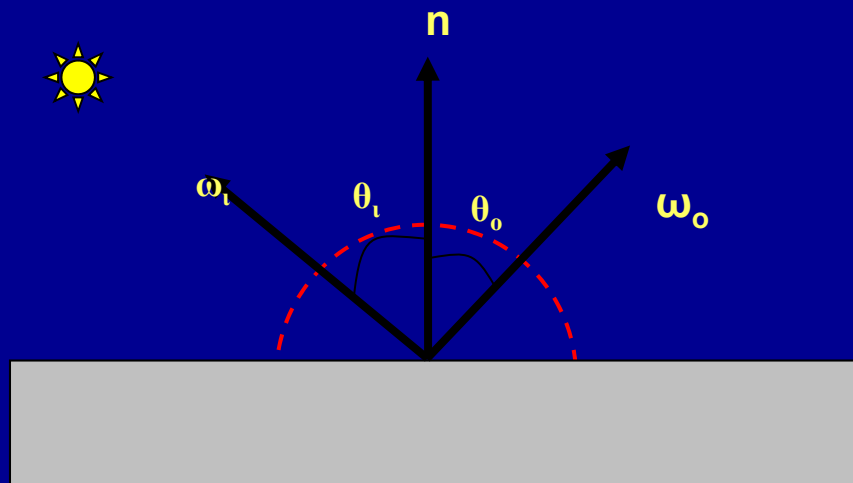
Το φως αλληλεπιδρά με την επιφάνεια στην οποία προσπίπτει με διάφορους τρόπους. Ισχύει ότι

προσπίπτον φως = ανακλώμενο φως + διαχεόμενο φως + απορροφούμενο φως + μεταδιδόμενο φως



# Φυσική του φωτός: BRDF

BRDF – Bidirectional Reflectance Distribution Function – συνάρτηση που περιγράφει πώς το φως ανακλάται από μια επιφάνεια. Εξαρτάται από το υλικό στο οποίο προσπίπτει το φως :  $f(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i)$



$$L(\theta_o, \phi_o) = \int \int_{\Omega} f(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i) L(\theta_i, \phi_i) \cos(\theta_i) d\sigma(\theta_i, \phi_i)$$

Πολύ πολύπλοκος τρόπος υπολογισμού φωτισμού!! Ακριβής, αλλά δύσκολο να υπολογιστεί σε πραγματικό χρόνο.

# Πρακτικά μοντέλα φωτισμού

Η BRDF είναι πολύ πολύπλοκη, χρειαζόμαστε ένα απλούστερο μοντέλο για το πώς αλληλεπιδρά το υλικό με το φως.

Παρατηρούμε την φύση:

- Το φως ανακλάται πολλές φορές στις επιφάνειες και δημιουργεί ένα «ομοιόμορφο» φωτισμό στην σκηνή
- Στα γραφικά το αναπαριστούμε αυτό με μια σταθερά έμμεσου φωτισμού (ambient light)
  - Καλούμε  $m_a = (r_m, g_m, b_m)$  το χρώμα του υλικού
  - Καλούμε  $s_a = (r_s, g_s, b_s)$  το χρώμα του φωτός
  - Τότε  $i_a = m_a * s_a$  θα είναι το χρώμα της επιφάνειας λόγω **έμμεσου φωτισμού**
  - Με την σταθερά έμμεσου φωτισμού ένα αντικείμενο θα φαίνεται έστω και αν δεν φωτίζεται απευθείας από μια πηγή



# Χρώμα υλικού; Χρώμα φωτός;

Μιλήσαμε για χρώμα υλικού (material)  $\mathbf{m}$  και χρώμα φωτός  $\mathbf{s}$  και το γινόμενο τους  $\mathbf{m.s}$ .

Αυτό το γινόμενο δίνει ένα **διάνυσμα** που εκφράζει το γεγονός ότι ένα υλικό απορροφά μερικά συστατικά του χρώματος του φωτός και ανακλά κάποια άλλα.

Παράδειγμα: Έστω ένα κόκκινο αντικείμενο με χρώμα υλικού  $\mathbf{m} = (1.0, 0.0, 0.0)$ . Αν φωτίσω το αντικείμενο αυτό με ένα άσπρο φως  $\mathbf{s} = (1.0, 1.0, 1.0)$  τότε το γινόμενο  $\mathbf{m.s}$  θα δώσει  $(1.0, 0.0, 0.0)$ , δηλαδή το ανακλώμενο φως θα είναι κόκκινο.

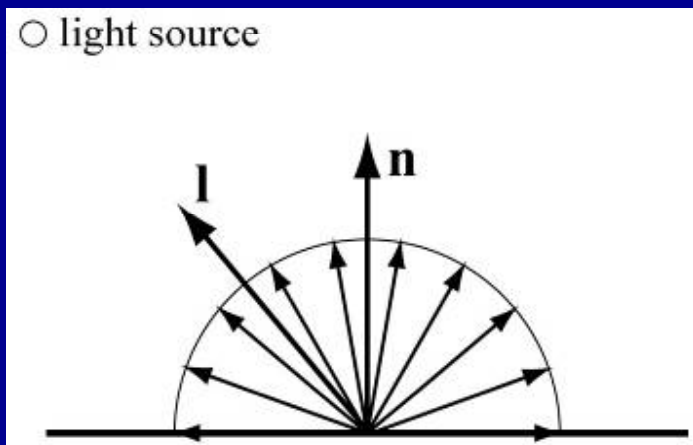
Αν το χρώμα του φωτός είναι μπλε  $\mathbf{s} = (0.0, 0.0, 1.0)$ , τότε από το γινόμενο προκύπτει ότι  $\mathbf{m.s} = (0.0, 0.0, 0.0)$ , **πράγμα που σημαίνει ότι μια κόκκινη επιφάνεια θα φανεί μαύρη κάτω από ένα μπλε φως!**

# Πρακτικά μοντέλα φωτισμού

Παρατηρούμε επίσης ότι μερικές επιφάνειες (ξύλο) φαίνονται ματ δηλαδή ανακλούν το φως ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις

Εισάγουμε τον όρο της διάχυτης αντανάκλασης (**diffuse reflection**)  $i_d$

- Νόμος του Lambert :  $i_d = nl = |n||l|\cos\phi = \cos\phi$
- Λαμβάνοντας υπόψη το χρώμα του φωτός  $s_d$  και το χρώμα του υλικού  $m_d$  έχουμε ότι  
$$i_d = (nl) m_d * s_d$$
- Ο διάχυτος φωτισμός δεν εξαρτάται από την θέση του παρατηρητή.

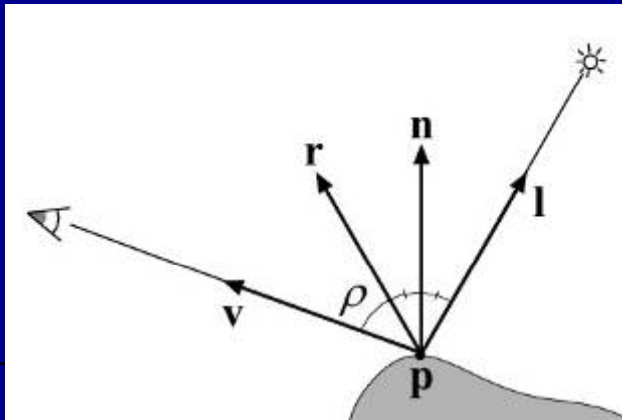


# Πρακτικά μοντέλα φωτισμού

Επιπλέον μερικές επιφάνειες (πχ μέταλλο) έχουν μια έντονη κατευθυνόμενη αντανάκλαση που αλλάζει με την θέση του παρατηρητή.

Εισάγουμε τον όρο της κατευθυνόμενης ανάκλασης (**specular reflection**)  $i_s$

- παράγει την “αντανάκλαση” της φωτεινής πηγής μέσα στα αντικείμενα  
 $i_s = (rv)^m m_s * s_s$
- το διάνυσμα  $r$  είναι η ανάκλαση του διανύσματος  $l$  που δείχνει το φως, και εξαρτάται από την γεωμετρία.
- το διάνυσμα  $v$  δείχνει την θέση του παρατηρητή.
- $m$  εκφράζει πόσο «γυαλιστερή» είναι η επιφάνεια. Όσο μεγαλύτερο τόσο μεγαλώνει και η ένταση της ανάκλασης.
- Η κατευθυνόμενη ανάκλαση (γυαλάδα) εξαρτάται από τη θέση του παρατηρητή.



# Μοντέλο φωτισμού Phong

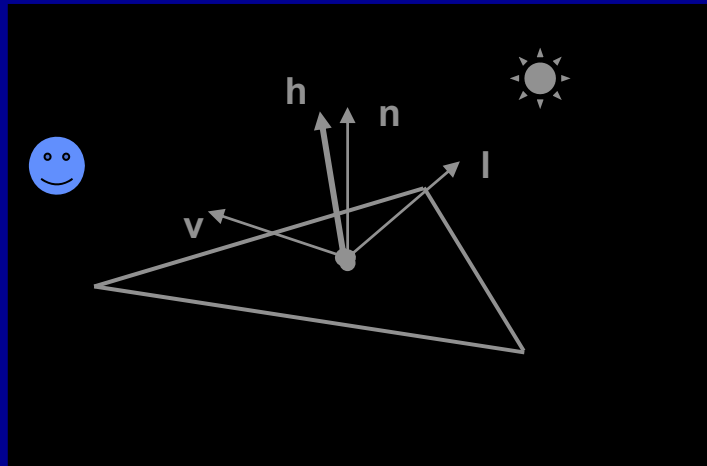
Το μοντέλο φωτισμού Phong συνδυάζει έμμεσο, διάχυτο φωτισμό και κατευθυνόμενη ανάκλαση για να υπολογίσει το χρώμα  $I_{\text{phong}}$  ενός αντικειμένου.

$$I_{\text{phong}} = I_{\text{ambient}} + I_{\text{diffuse}} + I_{\text{specular}}$$
$$I_{\text{phong}} = m_a * s_a + (nl) m_d * s_d + (rv)^m m_s * s_s$$



# Μοντέλο φωτισμού Blinn

Μια δημοφιλής παραλλαγή του μοντέλου Phong είναι το μοντέλο φωτισμού Blinn. Υπολογίζει τον όρο της κατευθυνόμενης ανάκλασης λίγο διαφορετικά από ότι το μοντέλο Phong:



$$I_s = (nh)^m m_s * s_s$$

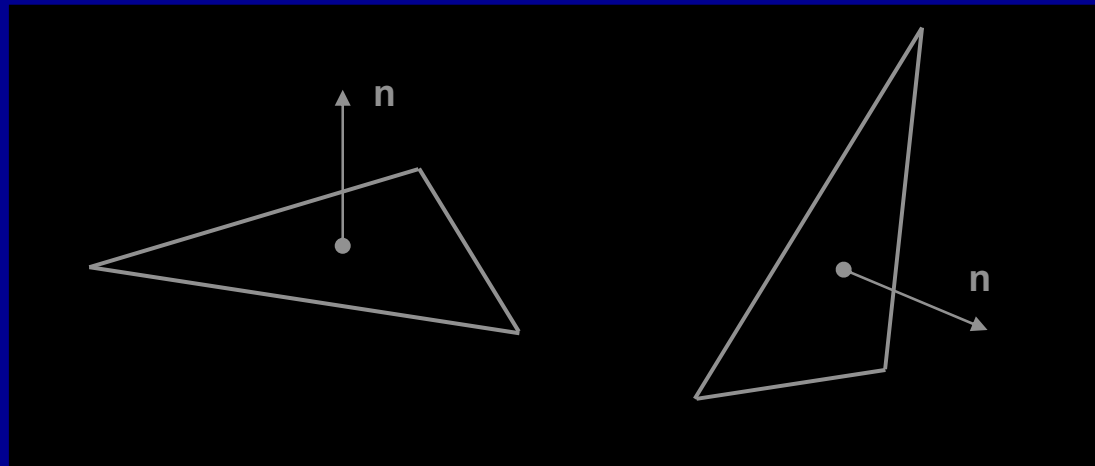
- $h = |v + l| / |v + l|$
- γρηγορότερο από Phong (δεν χρειάζεται να υπολογίσουμε διάνυσμα ανάκλασης, οπότε δεν εξαρτάται από την γεωμετρία)
- Αν το φως είναι κατευθυνόμενο (directional) και ο παρατηρητής δεν κινείται το  $h$  μένει σταθερό σε όλη τη σκηνή.

Ούτε το μοντέλο φωτισμού Phong ούτε η παραλλαγή του Blinn έχουν φυσική ερμηνεία. Απλά δίνουν καλά αποτελέσματα και υπολογίζονται σχετικά εύκολα.

# Κανονικό διάνυσμα

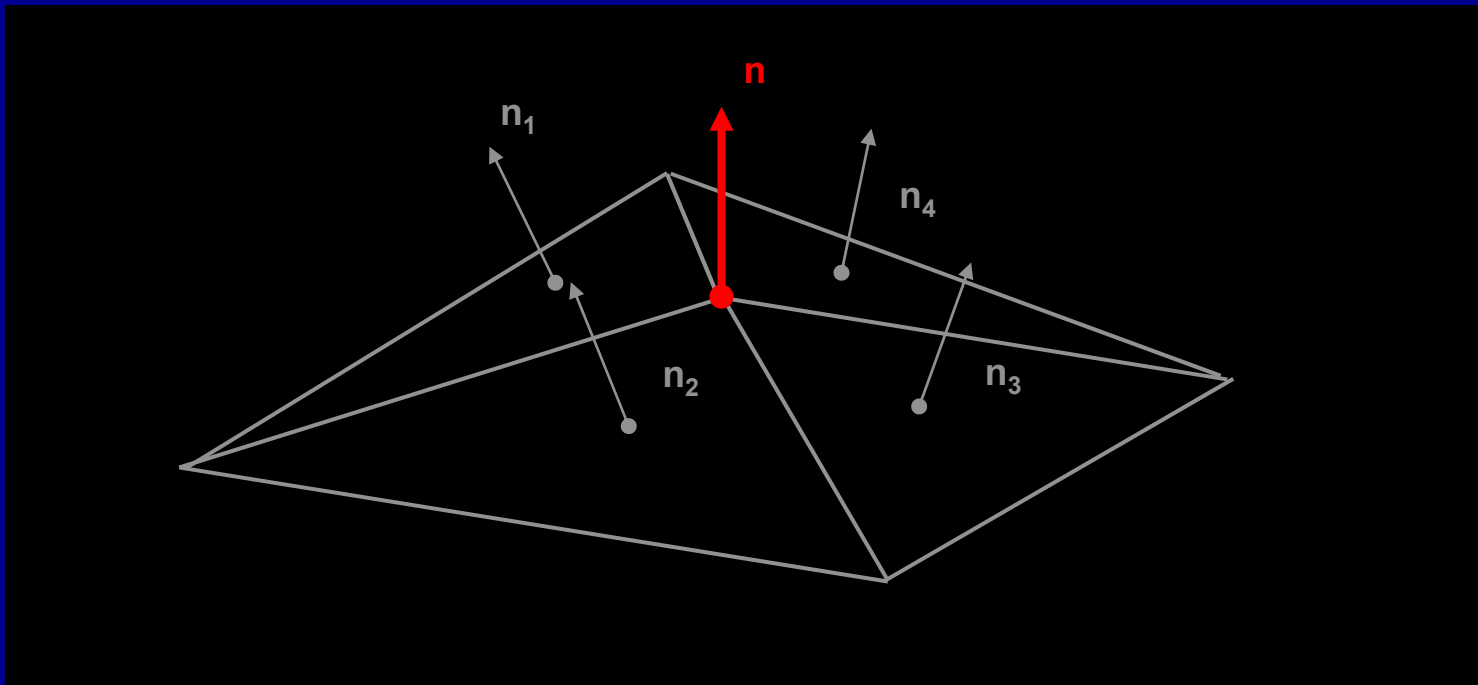
Υπενθύμιση : Μιλήσαμε για το κανονικό διάνυσμα μιας επιφάνειας (τριγώνου).

- Είναι κάθετο στην επιφάνεια
- Έχει μήκος 1
- Μας δηλώνει κατεύθυνση επιφάνειας
- Αντιπροσωπεύει το τρίγωνο σε πολλές πράξεις (πχ καθορισμός ορατότητας)



# Κανονικό διάνυσμα κορυφής

Κατ' επέκταση, μπορούμε να ορίσουμε και το κανονικό διάνυσμα στις κορυφές του τριγώνου.

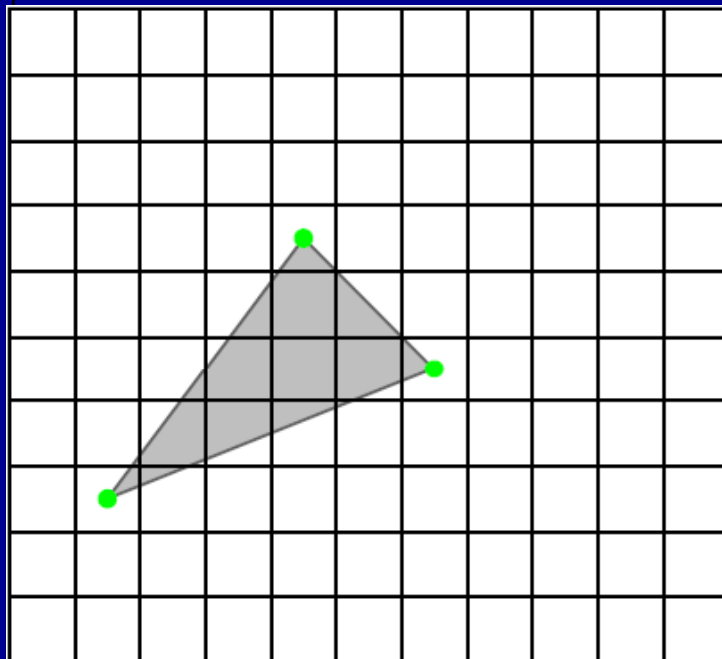


$$n = 1/4 ( n_1 + n_2 + n_3 + n_4 )$$

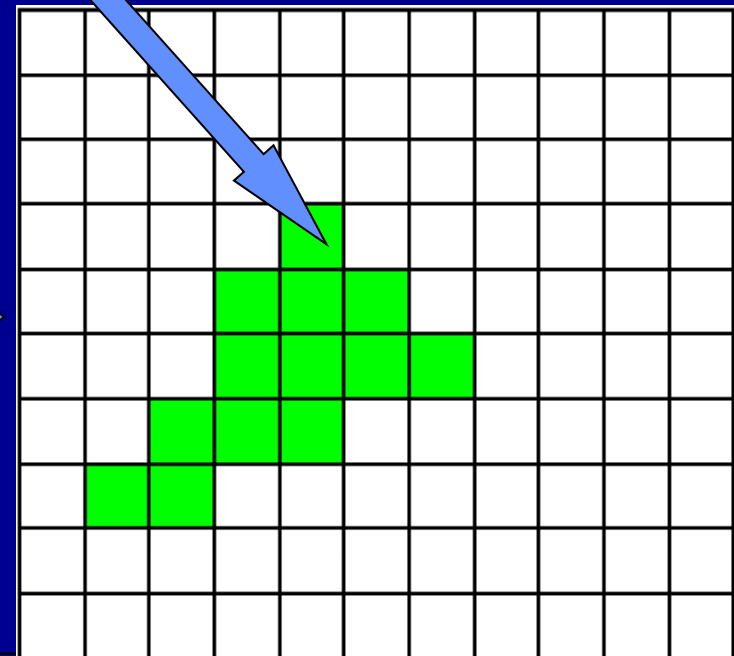
# Χρωματισμός αντικειμένου

Χρωματισμός (shading) ενός αντικειμένου ονομάζουμε τους υπολογισμούς που πραγματοποιούμε με το φως ώστε να καθορίσουμε το χρώμα της επιφάνειας

Shading: Τι χρώμα θα βάψω το pixel;



Rasterisation



# Χρωματισμός αντικειμένου

Οι τρεις πιο δημοφιλείς τρόποι χρωματισμού ενός τριγώνου είναι

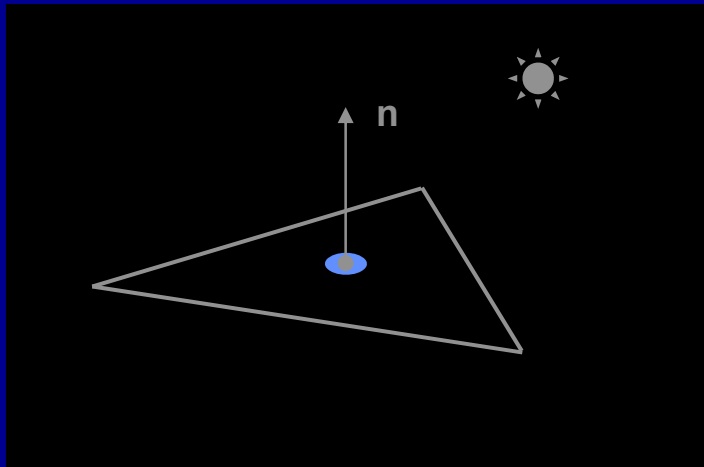
- Σταθερός χρωματισμός (flat shading)
- Gouraud shading
- Phong shading

Μια μέθοδος χρωματισμού τριγώνου ΔΕΝ καθορίζει το μοντέλο φωτισμού. Αφορά το τι χρώμα θα πάρει το τρίγωνο σε κάθε σημείο (pixel). Ο φωτισμός με τα μοντέλα που είδαμε είναι ένας τρόπος να χρωματίσουμε το τρίγωνο. Υπάρχουν και άλλοι (πχ υφές).

# Χρωματισμός αντικειμένου : Σταθερός

Ο σταθερός χρωματισμός χρησιμοποιεί το κανονικό διάνυσμα του τριγώνου για να υπολογίσει το χρώμα ολόκληρου του τριγώνου

Ο χρωματισμός (χρώμα) παραμένει ο ίδιος για όλη την επιφάνεια του τριγώνου

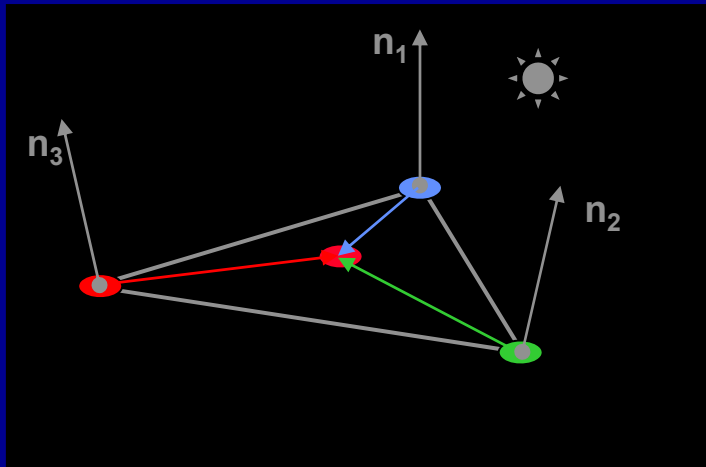


Θετικά/Αρνητικά

- Πολύ γρήγορη μέθοδος, ένας υπολογισμός χρώματος ανά τρίγωνο.
- Παρατηρούνται αλλαγές φωτεινότητας από πολύγωνο σε πολύγωνο
- Δεν μπορούμε να δημιουργήσουμε εύκολα κατευθυνόμενη ανάκλαση (γυαλάδα) στο μοντέλο

# Χρωματισμός αντικειμένου : Gouraud

Ο χρωματισμός Gouraud χρησιμοποιεί τα κανονικά διανύσματα στις κορυφές του τριγώνου για να υπολογίσει το χρώμα σε κάθε μια. Στην συνέχεια με γραμμική παρεμβολή (linear interpolation) των 3 αυτών χρωμάτων υπολογίζει το χρώμα του τριγώνου.

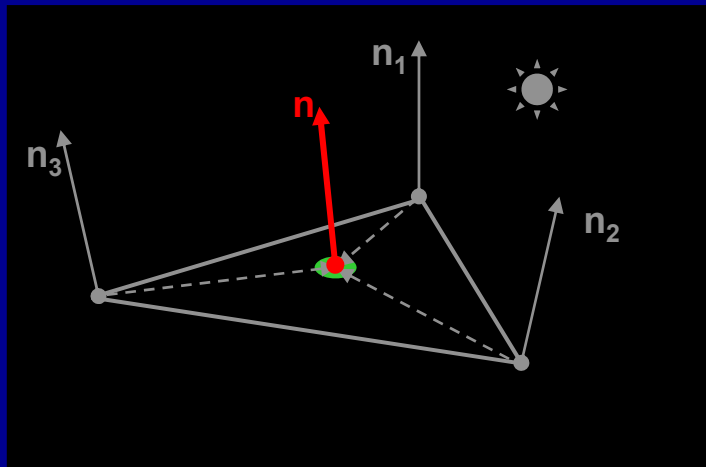


Θετικά/Αρνητικά

- Αρκετά γρήγορη μέθοδος, υπολογισμοί 3 χρωμάτων ανά τρίγωνο
- Μπορεί να χάσει κατευθυνόμενη ανάκλαση (γυαλάδα) αν δεν είναι κοντά σε κορυφή.
- Ακόμα και αν είναι κοντά σε κορυφή η ένταση διαχέεται σε όλο το τρίγωνο
- Απαιτεί μεγάλο αριθμό τριγώνων για καλό αποτέλεσμα

# Χρωματισμός αντικειμένου : Phong

Ο χρωματισμός Phong υπολογίζει την γραμμική παρεμβολή των κανονικών διανυσμάτων στις κορυφές του τριγώνου (σε αντίθεση με την Gouraud που κάνει γραμμική παρεμβολή χρωμάτων) για να υπολογίσει ένα νέο κανονικό διάνυσμα στο σημείο που θέλουμε να χρωματίσουμε.



Θετικά/Αρνητικά

- Δεν χάνονται οι κατευθυνόμενες ανακλάσεις (γυαλάδες)
- Αξιοπρεπή αποτελέσματα ακόμα και με μικρό αριθμό τριγώνων
- Ακριβή μέθοδος, απαιτεί πολλούς υπολογισμούς

# Διαφάνεια

Διαφάνεια (transparency) ονομάζεται το φαινόμενο στο οποίο ένα υλικό αφήνει το φως να περάσει από μέσα του.



Υπάρχουν διαφορετικές διαβαθμίσεις διαφάνειας υλικού, από εντελώς διαφανές (αέρας) μέχρι ημιδιαφανές (χρωματιστό γυαλί) μέχρι αδιαφανές (ένα κομμάτι ξύλο)

# Διαφάνεια

Κατά την παραγωγή τριδιάστατων γραφικών χρησιμοποιούμε ένα απλό μοντέλο διαφάνειας.

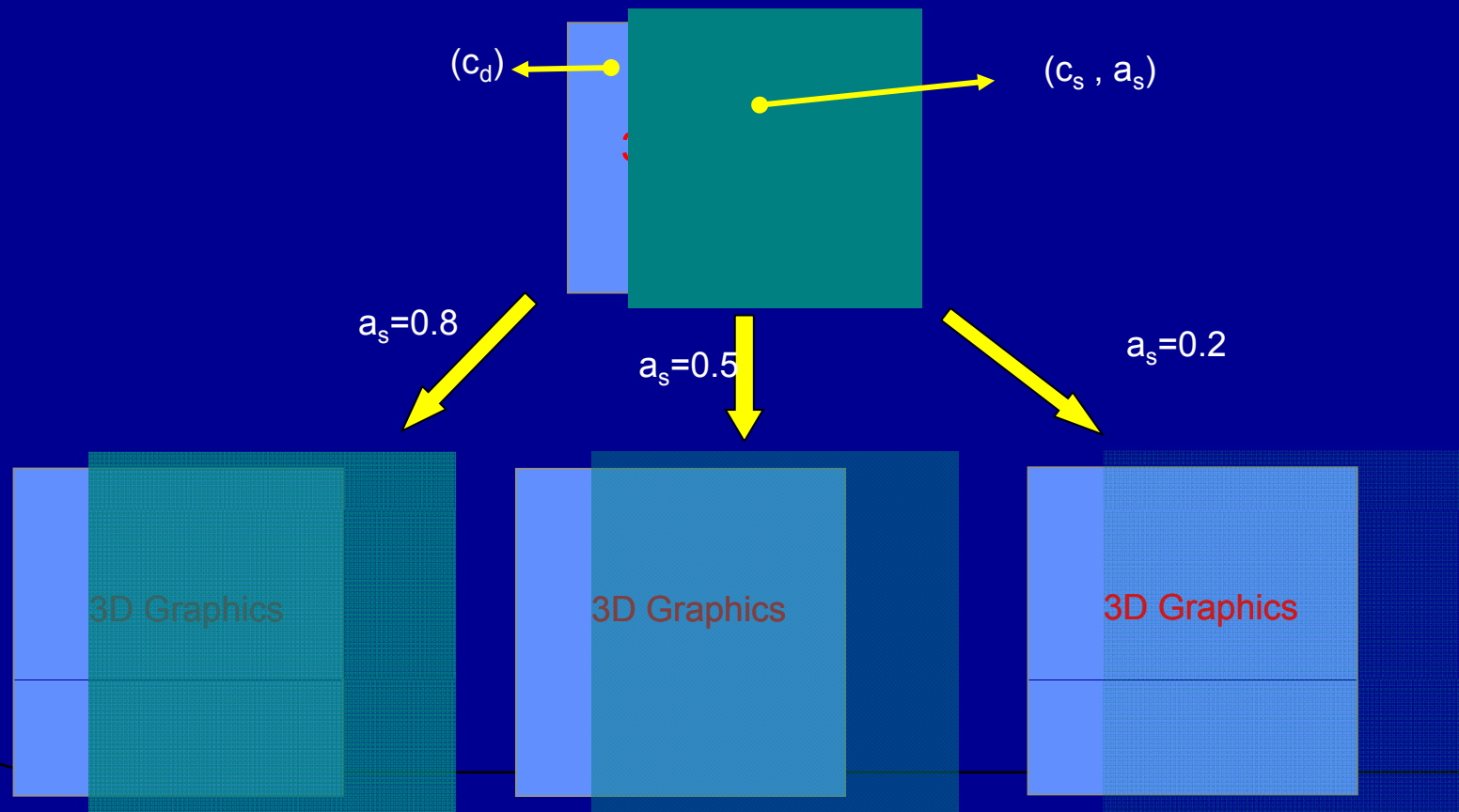
Προσθέτουμε ακόμα ένα συστατικό στο RGB χρώμα του τριγώνου (κορυφών τριγώνου), το A (alpha).

- Το alpha εκφράζει πόσο διαφανές είναι το υλικό
- Παίρνει τιμές από το διάστημα  $[0, 1]$
- $\alpha = 0$  σημαίνει ότι το υλικό είναι εντελώς διαφανές
- $\alpha = 1$  σημαίνει ότι το υλικό είναι αδιαφανές

# Διαφάνεια

Την διαφάνεια ( $a$ ) την χρησιμοποιούμε κατά την σύνθεση της σκηνής μέσω του τελεστή σύνθεσης (over operator)

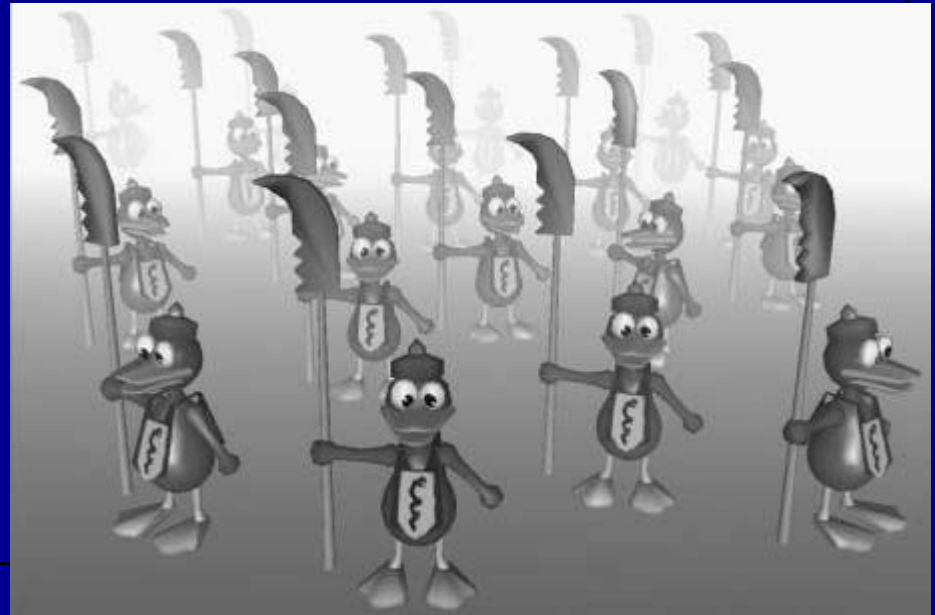
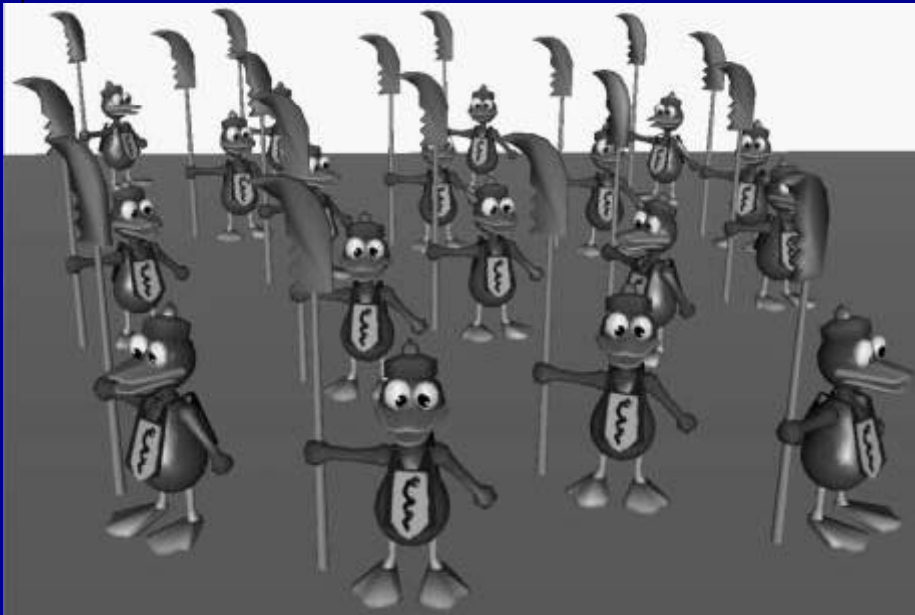
$$c_o = a_s c_s + (1 - a_s) c_d$$



# Ομίχλη

Η ομίχλη είναι ένα απλό εφέ που προστίθεται στην σκηνή

- Κάνει την σκηνή λίγο πιο ρεαλιστική
- Προσθέτει ατμόσφαιρα
- Δίνει μια αίσθηση των αποστάσεων/βάθους στην σκηνή
- Κυρίως: είναι ένας φτηνός τρόπος να γλυτώσουμε τα πολλά αντικείμενα σε μια σκηνή (επειδή δεν φαίνονται μέσα στην ομίχλη).



# Ομίχλη



# Ομίχλη

Για να υπολογίσουμε την ομίχλη σε ένα σημείο της σκηνης απλά αναμειγνύουμε το χρώμα του σημείου με το χρώμα της ομίχλης.

Αν  $c_f$  το χρώμα της ομίχλης και  $c_s$  το αρχικό χρώμα του σημείου, τότε το χρώμα του σημείου με ομίχλη θα είναι

$$c_p = fc_s + (1-f)c_f$$

Πώς υπολογίζεται το  $f$ ;

- Με γραμμικό, εκθετικό ή τετραγωνισμένο εκθετικό τρόπο
- Γραμμικός :  $f = (z_{end} - z_p) / (z_{end} - z_{start})$ 
  - $z_{start}$ ,  $z_{end}$  : βάθος της σκηνης που αρχίζει και τελειώνει η ομίχλη,  $z_p$  : βάθος του σημείου που χρωματίζουμε